

Tendances actuelles de la prospection sismique des massifs rocheux

New trends in seismic investigation of rock masses

Heutige Tendenzen der sismischen Forschung des Gesteins

par J. LAKSHMANAN, Ingénieur Géologue

Directeur scientifique de la Compagnie de Prospection Géophysique Française
16, rue d'Athènes, Paris (9^e)

Résumé

L'utilité d'une prospection sismique est assez généralement reconnue lors de l'étude des projets de fondations sur massifs rocheux, peut-être parce que, en dehors des vérins et dilatomètres, peu de méthodes géotechniques sont applicables. Toutefois, la corrélation des résultats obtenus avec les caractéristiques de déformabilité ou de rupture est souvent discutée. Cette note cherche à préciser les apports possibles des méthodes sismiques, outre les recherches classiques de contacts ou d'accidents géologiques, lors de l'étude de l'état de fissuration et de décompression du massif rocheux. En particulier, la notion de vitesse «basale», caractéristique d'un type de roche, est dégagée permettant la comparaison du site prospecté avec un massif de référence. Une distinction a été établie entre la phase de prospection, comprenant essentiellement des mesures de surface, et celle d'étude détaillée et d'auscultation à partir de galeries ou de sondages, en relation avec les essais statiques. Enfin, l'étude des phénomènes d'amortissement et de filtrage naturel des fréquences, est abordée avec l'application nouvelle d'un matériel multivoies à enregistrement magnétique, dérivé des appareils utilisés en prospection pétrolière.

Les premières études sismiques de sites de barrages étaient souvent structurales; il s'agissait de préciser la position d'un niveau stratigraphique, d'un bedrock ou d'un accident. Mais rapidement, il a été demandé aux mesures sismiques de fournir des indications quantitatives des caractéristiques élastiques des rochers de fondations. La confrontation avec les résultats de mesures statiques a alors été souvent décevante. L'expérience a montré que chaque type de rocher a des caractéristiques dynamiques très constantes, et qu'il est valable de comparer, par les vitesses sismiques, deux sites de même nature géologique.

Summary

The use of seismic prospecting in the elaboration of rock foundation projects is quite generally accepted, perhaps because few geotechnical methods except hydraulic jack-tests or geodilatometers can be applied. However, correlation of seismic results with static deformability is not always satisfactory. In this note an attempt is made to discuss the value of seismic measurements in the study of the state of decompression of rock mass. The idea of a «base velocity», typical of each type of rock is introduced. It is therefore possible to compare different rock masses. A difference is made between the prospection of a rock mass from the surface, and the detailed study from drill holes or tunnels, in relation with static tests. Lastly, the use of multichannel, magnetic tape seismographic recorders, similar to those used in the oil industry, is suggested. Detailed study of frequencies and of absorption coefficients can be carried out.

Zusammenfassung

Beim Studium von Unterbauprojekte auf Gestein ist die Nützlichkeit der sismischen Forschung allgemein anerkannt, denn außer Preßtopf und Dehnungsgerät sind hier wenige geotechnische Methoden anwendbar. Immerhin wird der Zusammenhang der erzielten Ergebnisse mit den Charakteristiken der Verformbarkeit oder Bruchfestigkeit häufig angefochten. Diese Artikel möchte die mögliche Beiträge der sismischen Methoden (außer der klassischen Forschungen der geologischen Kontakte oder Hügeligkeit) erläutern, beim Studium des Zustandes der Ribbildung und der Kompressionsverminderung des Gesteins. Besonders wird der Begriff der «Grundgeschwindigkeit», bezeichnend für ein Gesteinsart hervorgehoben, die ein Vergleich der Forschungsstelle mit einem Beleg-Grundgebirge ermöglicht. Ein Unterschied wurde zwischen der Forschungsphase, der sich hauptsächlich mit Oberflächenmessungen befaßt, und der Phase der eingehenden Untersuchung und Behorchung von Abbaustrecken und Erdbohrungen, in Zusammenhang mit statischen Versuchen aufgestellt. Schließlich werden die Abschwächungserscheinungen und die natürliche Filtration der Frequenzen untersucht, mit der neuen Anwendung eines Mehrstreckigen Materials der magnetischen Aufzeichnung, eine Abart der Apparate, die man bei der Erdölforschung verwendet.

On peut distinguer deux phases dans l'étude sismique: la *prospection* initiale, essentiellement à partir de la surface, et l'*auscultation* du rocher de fondation, par mesures en galeries, en sondages, ou en fond de fouille. Dans le premier cas, le terrain, altéré en surface, a des vitesses croissantes avec la profondeur. Afin de pouvoir atteindre le terrain situé à 10, 20 ou 30 m de profondeur, il faut utiliser des bases sismiques de 100 à 300 m de longueur. L'existence d'arrivées successives réfractées rend alors douteuse l'identification d'ondes transversales. Par contre, dans l'auscultation, on peut travailler sur des bases décimétriques, mé-

triques ou même décimétriques, sur un matériau homogène. L'étude des ondes transversales est alors aisée, et il est possible d'aborder de façon positive l'étude de l'amortissement de l'énergie sismique.

Nous considérons, ici, essentiellement la prospection des massifs rocheux, en grande masse, à partir de la surface, c'est à dire que nous nous attacherons essentiellement à l'examen des vitesses longitudinales.

L'interprétation des mesures de sismique réfraction est fondée en général sur des méthodes élaborées entre les deux guerres pour des études structurales. Pour de tels problèmes, il est logique de supposer une succession de vitesses, en identifiant chaque vitesse à une couche bien définie géologiquement, et ayant une certaine continuité horizontale. Un profil sismique permet alors de suivre un «marqueur sismique» et des formules bien connues, dérivées des lois de l'optique, permettent de calculer à chaque point de tir, et même pour chaque implantation de sismographe, la profondeur des différents «marqueurs» à partir des graphiques temps-distances, appelés «dromochroniques».

Si les mesures des temps et des distances se font de façon assez précise, la première étape de l'interprétation est la plus délicate, car elle comporte une part d'appréciation subjective. Il s'agit d'identifier sur la dromochronique (fig. 1) différents tronçons de droite, où l'inverse des pentes représente les vitesses correspondantes (nous ne rentrerons pas ici dans les détails de pendages, failles, etc...).

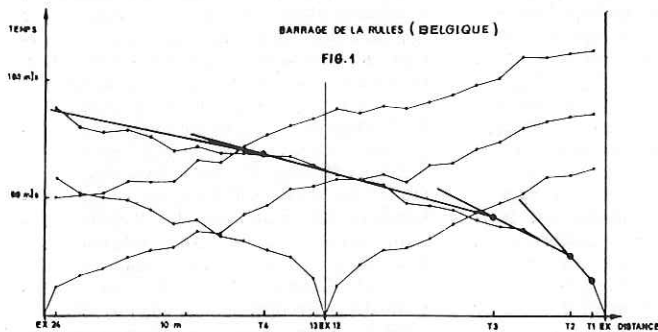


Fig. 1

Suivant les cas, cette identification est plus ou moins aisée; elle n'est que rarement univoque. Dans le cas d'étude de structures géologiques continues, l'étalonnage par sondage mécanique permet de vérifier et, éventuellement, de modifier le choix des vitesses, et ainsi d'aboutir à une interprétation finale valable.

Lors de l'étude de l'état de fissuration d'un massif rocheux par sismique réfraction à partir de la surface du sol, ces mêmes méthodes de mesure et d'interprétation sont habituellement appliquées, et permettent de définir des pseudocouches par leur vitesse et leur profondeur.

S'il est aisé par de telles méthodes d'interprétation de distinguer entre un très bon et un très mauvais site, l'appréciation des nuances est plus délicate. En effet, les vitesses croissent plus ou moins régulièrement avec la profondeur, et les dromochroniques sont alors des courbes continues, concaves vers le bas. Certes, la sélection de tronçons de droites reste possible, et les interprétations quantitatives obtenues ont permis d'intéressantes corrélations entre les plages de vitesse et l'état de fissuration et d'altération, apprécié à l'oeil et aussi mesuré par essais Lugeon (1).

Cependant, des ambiguïtés peuvent subsister, et de toute manière, il est logique d'espérer pouvoir tirer da-

vantage de résultats des 120 mesures de temps d'un dispositif sismique classique (24 sismographes × 5 tirs.)

Lors de l'étude sismique du granite devant constituer le rocher de fondation du barrage de Calacuccia (Corse) (2),

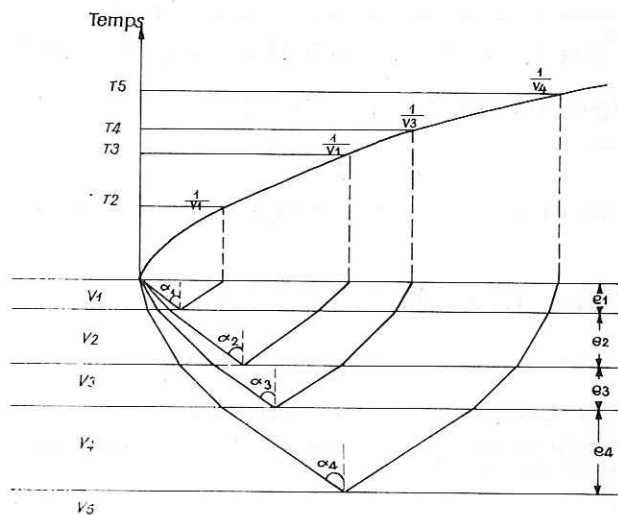


Fig. 2

une interprétation a été faite en supposant des vitesses (V) croissant avec la profondeur (p) suivant une loi linéaire de vitesses:

$$V_p = V_0 + kp$$

pour $p < p_B$; au-delà de cette profondeur, la vitesse a été supposée constante (V_B).

Pour ce même site, l'interprétation classique par tronçons de droites a conduit à placer le granite sain ($V_B = 5000$ à 6000 m/s) à la même profondeur d'environ 30 m, à 10 % près.

Mais dans la plupart des sites de barrages, ce qui est le plus utile, c'est de connaître la répartition des vitesses au niveau futur des fondations et immédiatement en dessous. Dans le cas du granite ou du gneiss, il s'agit des zones de vitesses comprises entre 2500 et 3800 m/s en général.

Nous avons donc cherché à établir une méthode permettant de déterminer en chaque point la loi de vitesses, quel que soit son type, à partir des dromochroniques.

En suivant JAKOSKY (3), on peut montrer que pour une loi de vitesse quelconque, à condition qu'elle soit croissante avec la profondeur, on a:

$$H = \frac{1}{2} \int_{x=0}^{x=D} \left[\left(\frac{V_D}{V_x} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} dx$$

$$t_D = \int_{x=0}^{x=D} \frac{dx}{(V_x)^2}$$

$$\text{et } \frac{dx}{dt} = V_D$$

(1) 8ème Congrès des Grands Barrages: M. M. BELLIER, BERNEDE, BOLLO, J. DUFFAUT, PERA, COMES, LAKSHMANAN, P. DUFFAUT, WILLM, MAZENOT, ROGISSART — *La déformabilité des massifs rocheux, analyse et comparaison des résultats.*

(2) Compagnie de Prospection Géophysique Française: Electricité de France, R. E. H. Alpes IV — *Etude géophysique et géologique du barrage de Calacuccia* — 1962.

(3) J. J. JAKOSKY, *Exploration Geophysics*, Trija Publishing Co., Newport Beach, Calif., 1957.

x et t sont les coordonnées d'un point de la dromochronique,

V_x la vitesse à la distance x

V_D la vitesse à la profondeur (H) la plus grande atteinte, ce qui correspond à la distance horizontale $x = D$.

En supposant des tranches de vitesse constante $V_1, V_2, V_3, V_4 \dots$, d'épaisseurs $e_1, e_2, e_3, e_4 \dots$, il est possible d'arriver facilement à des solutions approchées à condition de supposer des rapports simples entre les vitesses.

On a :

$$T_2 = \frac{2e_1}{V_1 \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2}} \quad (\text{Voir figure 2})$$

$$T_3 = \frac{2e_1}{V_1 \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_3}\right)^2}} + \frac{2e_2}{V_2 \sqrt{1 - \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^2}}$$

$$T_p = 2 \sum_{i=1}^{i=p-1} \frac{e_i}{V_i \sqrt{1 - \left(\frac{V_i}{V_p}\right)^2}}$$

D'où :

$$e_1 = \frac{V_1 \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2}}{2} \cdot T_2$$

$$e_2 = \frac{V_2 \sqrt{1 - \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^2}}{2} \cdot \left\{ T_3 - \frac{2e_1}{V_1 \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_3}\right)^2}} \right\}$$

$$e_{p-1} = \frac{V_{p-1} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{p-1}}{V_p}\right)^2}}{2} \cdot \left\{ T_p - 2 \sum_{i=1}^{i=p-2} \frac{e_i}{V_i \sqrt{1 - \left(\frac{V_i}{V_p}\right)^2}} \right\}$$

Pour cinq couches, et pour $V_1 : V_2 : V_3 : V_4 : V_5 = 0,5 : 1 : 2 : 3 : 4 : 5$,

on obtient :

$$\frac{e_1}{V_1} = 0,43 T_2$$

$$\frac{e_2}{V_2} = 0,43 T_3 - 0,39 T_2$$

$$\frac{e_3}{V_3} = 0,38 T_4 - 0,34 T_3 - 0,02 T_2$$

$$\frac{e_4}{V_4} = 0,33 T_5 - 0,29 T_4 - 0,02 T_3$$

Dans l'exemple suivant (fig. 3) concernant un barrage projeté sur des schistes dévoniens⁽¹⁾, on a comparé les lois de vitesses obtenues par cette formule avec deux séries de rapports de vitesses, et par la méthode classique.

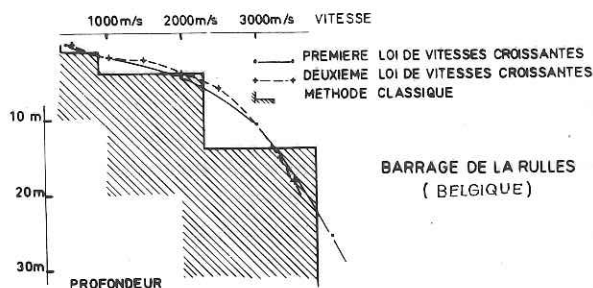


Fig. 3

Ayant ainsi un moyen pour définir de façon plus précise, avant sondages et carottages sismiques, la vitesse réelle du rocher au niveau de fondation, on peut chercher alors à comparer cette vitesse à celles d'autres sites fondés sur des terrains similaires, et aussi à comparer cette vitesse à la «vitesse basale» (V_B) du terrain.

Nous avons été amenés à introduire cette notion car toutes les études effectuées montrent des vitesses croissantes avec la profondeur, mais asymptotiquement. Qui plus est, cette asymptote est pratiquement la même pour une roche donnée. Citons pour le granite les moyennes suivantes :

Cotonou (Dahomey)	5 450 m/s
Kourou (Guyane Française)	5 050 m/s
Calacuccia (Corse)	5 200 m/s
Mont Aigoual (Hérault)	4 750 m/s

Pour une cinquantaine de sites granitiques, les vitesses basales moyennes varient entre 4 700 et 5 600 m/s.

Pour huit sites dans la craie, la vitesse basale varie entre 2 150 et 2 450 m/s.

En suivant une idée de J. GERVAISE et Ch. MALLET (C. E. R. N., Genève), on peut envisager de considérer

(1) C. P. G. F.: Société d'Etudes pour l'Alimentation en eau de l'Est de la France — Barrage de la Rulles (Belgique) — 1962.

le rapport $\frac{V}{V_B}$ comme une caractéristique du rocher de fondation. Pour une douzaine de sites de barrages en béton existants ou projetés en France, le rapport $\frac{V}{V_B}$ varie entre 0,52 et 0,75.

Pour conclure, signalons que depuis peu, la C. P. G. F. a mis en oeuvre un appareillage à enregistrement magnétique (G.33 et MR4, de S. I. E., Houston, Texas), conçu initialement pour la prospection pétrolière, et modifié pour l'étude des massifs rocheux. Il s'agit d'un matériel à 24 canaux, permettant l'enregistrement simultané sur papier et sur bande magnétique. Le travail en «playback» permet de traiter à loisir les informations recueillies en jouant sur les gains et les filtres. Les bandes passantes sont larges (2 à 1000 Hz) et la précision de mesure des temps bonne (1/4 milliseconde). L'exemple ci-après (fig. 4) donne une idée du champ nouveau ouvert par la mise en oeuvre d'un tel matériel.

Le premier enregistrement («monitor») est brut, sans filtrage, et avec un gain élevé. Son dépouillement permet d'effectuer correctement les calculs de sismique réflexion. Pour le deuxième film obtenu par playback, les basses fréquences ont été atténuées (filtre 73 Hz) et sur le troisième les hautes fréquences ont été coupées par un filtre 165 Hz. Les gains ont été nettement diminués sur les films 2 et 3,

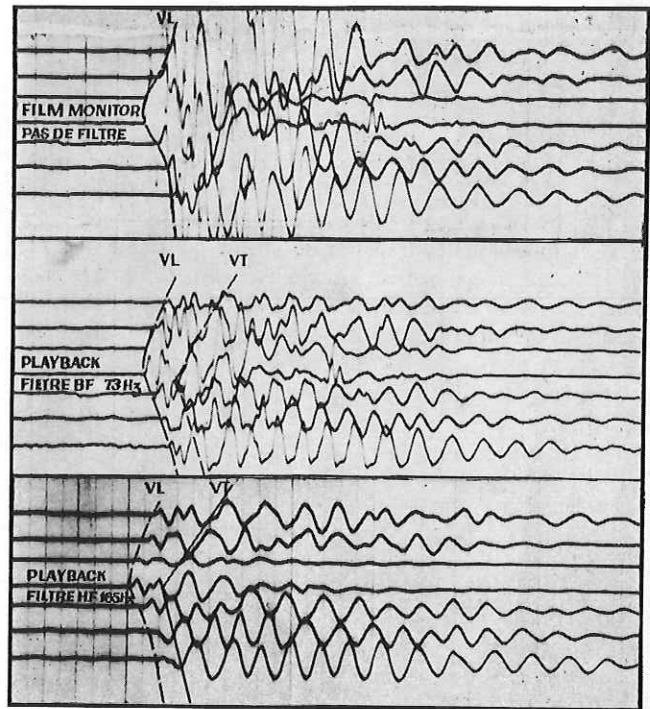


Fig. 4

pour permettre d'observer l'ensemble du signal. On voit nettement la différence entre l'onde longitudinale essentiellement de haute fréquence et l'onde transversale.